

Aus dem Anatomischen Institut der Universität Freiburg

Direktor: Professor Dr. Goerttler

Der Mechanismus der Radial- und Ulnarabduktion

ohne und mit Belastung

(Röntgenkinematographische Untersuchung zur Gelenkmechanik)

Auszug aus der

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Medizinischen Doktorwürde

einer

Hohen Medizinischen Fakultät

der

Albert-Ludwigs-Universität zu Freiburg im Breisgau

vorgelegt von

TRAUTE HENNIES

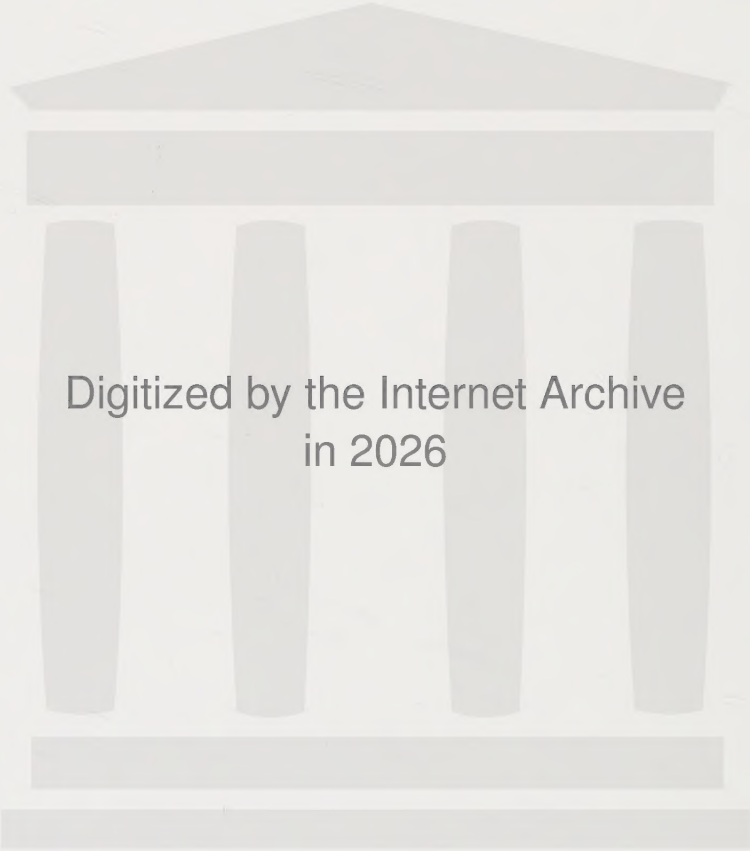
aus

Baden-Baden

1963

Dekan: Professor Dr. med. Wimhöfer

Referent: Professor Dr. med. A. Puff



Digitized by the Internet Archive
in 2026

*Aus dem Anatomischen Institut der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.
(Direktor: Prof. Dr. K. Goerttler)*

Der Mechanismus der Radial- und Ulnarabduktion ohne und mit Belastung

(Röntgenkinematographische Untersuchung zur Gelenkmechanik)¹

Von

A. Puff und T. Hennies

Mit 22 Abbildungen

(Eingegangen am 30. Dezember 1962)



Skelett, Bandapparat und Gelenke bilden den „passiven Bewegungsapparat“. Aus der Gestalt der Gelenkflächen, der Lage der Achsen und der am Leichenpräparat möglichen Bewegungen wurde unser Bild der Gelenkmechanik entwickelt. Dies kann bei einfachen Gelenken sicher den tatsächlichen Gelenkbewegungen nahekommen.

Bei zusammengesetzten Gelenken — wie Handgelenk — sind die Verhältnisse anders gelagert. Durch einen relativ straffen Bandapparat oder durch Muskelwirkung werden mehrere Knochen zu größeren Gelenkkörpern zusammengefaßt. Es ist anzunehmen, daß sich dann unter den äußerlich sichtbaren Gelenkbewegungen unterschiedliche Mechanismen verbergen, die von diesen funktionellen Verknüpfungen abhängig sind.

Nachdem röntgenkinematographische Untersuchungen am Fußskelett bei der Belastung des Fußgewölbes neue Ergebnisse gebracht haben, schien es aussichtsreich, mit Hilfe der gleichen Methode die Mechanik des Handgelenkes unter gezielter funktioneller Beanspruchung zu untersuchen. Ohne die genaue Kenntnis der normalen funktionellen Abläufe und Gegebenheiten ist auch eine sinnvolle Kausalanalyse patho-physiologischer Veränderungen nicht möglich.

Die unbefriedigenden Heilungserfolge bei den Navicular- (P. N. Scaphoid)² Frakturen veranlaßten uns, diesem Skeletteil im Rahmen der vorliegenden Untersuchung besondere Beachtung zu schenken.

¹ Unserem hochverehrten Lehrer Herrn Prof. K. Goerttler zum 65. Geburtstag in Dankbarkeit gewidmet.

² Im folgenden wird nur die alte Nomenklatur Naviculare verwandt, da auch der Kliniker weiterhin von Navicularfraktur sprechen wird.

Die ausführlichsten Arbeiten über die Mechanik des Handgelenkes stammen von R. Fick, T. v. Lanz und D. R. White. v. Lanz bezieht sich im wesentlichen auf die Arbeiten von Fick und Henkel. Diese Autoren beschreiben Bau und Mechanik der Gelenke nach Studien am Leichenpräparat. Sie schließen allerdings bereits die Röntgenaufnahme des Leichenpräparates und des lebenden Armes in ihre Betrachtungen mit ein (s. a. Price und Johnsen). Van Bounin hat die Bewegungen der lebenden Hand durch Stereoröntgenaufnahmen untersucht. In vielen Beobachtungen stimmen die meisten Autoren überein. Kontinuierliche Untersuchungen der Bewegungsabläufe am Lebenden wurden jedoch nicht unternommen.

Eine besonders eingehende Studie der Mechanik des Handgelenkes stammt von Douglas R. White. White hat zunächst die klassischen Methoden wie Fick und Henkel benutzt; er hat aber dann zusätzlich bereits versucht, funktionelle Gesichtspunkte, die durch die Muskulatur gegeben sind, mit zu berücksichtigen, indem er am Leichenpräparat den Muskelzug durch Zug an den betreffenden Sehnen rekonstruiert. Er hat diese Untersuchung am frischen Leichenmaterial, bei dem weder die Bänder noch die Gelenkkapseln in irgendeiner Weise verletzt oder geschrumpft waren, durchgeführt.

Wir wollen uns im folgenden nur auf die in der Literatur beschriebenen Mechanismen der Radial- und Ulnarabduktion beschränken.

Nach White ist die ulnare Abduktion im wesentlichen eine Gleitbewegung der proximalen Reihe der Carpalknochen an der Oberfläche der Radial- und Triangulärbänder. Das Zentrum dieser Bewegung lokalisiert er in die Mitte des Halses des Capitatum. Er beschreibt die Bewegungslinie als einen Kreisbogenabschnitt, der durch die proximale Oberfläche der proximalen Carpalreihe gebildet wird. Dabei kommt das ulnare Ende des Lunatum dicht neben den ulnaren Rand des Radius zu liegen. Er gibt das Ausmaß dieser Bewegung mit etwa 26° an. Das Hamatum bewegt sich, da es eng an das Capitatum gebunden ist, nach proximal und hat sogar gelegentlich Kontakt mit dem Lunatum. Die keilartige Wirkung des Hamatum verschiebt die proximale Reihe dachziegelförmig. Das Multan. maj. und Multan. min.¹ folgen dem Capitatum, und die lange Achse des Naviculare fügt sich in die Längsachse des Unterarms ein. Dabei wird das Multan. maj. und Multan. min. am volarsten Teil des Knorpels des Naviculareköpfchens etwa um 5 mm in ulnarer Richtung, und zwar relativ zu dieser Oberfläche, bewegt. White weist außerdem darauf hin, daß bei der Angabe der Winkelbewegungen und der Ebenen berücksichtigt werden muß, daß der Winkel zwischen der Hand und dem Unterarm außerordentlich variiert und davon

¹ Multangulum majus = Trapezium, Multangulum minus = Trapezoideum.

abhängig ist, ob der Radius oder der Processus styloideus oder die Gelenkfläche des Radius den Scheitelpunkt des Winkels bilden.

Nach Herzog treten in 4,5 % bei sogenannten „normalen“ Handgelenken Minusvarianten der Elle und in 20,3 % Minusvarianten der Speiche auf.

Über die Deutung des verwickelten Vorganges bei der Abduktionsbewegung herrscht aber noch keine Übereinstimmung (Benninghoff u. Goerttler).

Bei der Ulnarabduktion wird der Ulnarrand der Hand zusammengeschoben und die Radialseite entfaltet. Da nun der Ulnarrand mehr Weichteile enthält, so kann er leichter zusammengeschoben werden. Das Triquetrum soll daher nicht so sehr in Bedrängnis geraten, es wird vielmehr schon durch die radial gerichtete Seitenverschiebung der ersten Reihe zum Unterarm mehr quergestellt; gleichzeitig soll das Triquetrum etwas nach volar herausgedrängt werden. Da an der Radialseite, an der das Knochengefüge dichter ist, auch die Verschiebungen größer sein müssen, wird die zu erwartende Lücke durch die Umstellung des Naviculare ausgefüllt (Benninghoff u. Goerttler). Auch die Kippbewegung des Naviculare wird wieder rückgängig gemacht. Im Gegensatz zu den Flexionsbewegungen, bei denen beide Carpalreihen kippen, wird bei der Abduktion nur die erste Reihe verschoben und verformt, die mit der Mittelhand verbundene zweite Reihe wird nur seitlich, gegensinnig mit der ersteren verschoben (Benninghoff u. Goerttler).

Durch die Einschaltung eines Discus und anderer Weichteile ist die Ulnarseite auch leichter verformbar, so daß die Knochen hier nicht so stark ausweichen müssen, wie es mit dem Naviculare an der Radialseite der Fall ist.

Nach Lanz dreht sich bei den Abduktionsbewegungen der proximale Gelenkkörper der Handwurzelknochen um eine Achse durch die Kopfbeinmitte, während der distale Gelenkkörper sich nur seitlich, gleichsinnig mit dem proximalen verschiebt. Die Knochen der proximalen Gelenkkörper sollen außerdem eine Parallelverschiebung erfahren, die sich geringfügig gegeneinander staffelt. Den größten Ausschlag soll dabei das Dreiecksbein machen, welches durch die Radialabduktion vom Ellenköpfchen maximal entfernt wird. Bei der Ulnarabduktion wird es ihm so weit genähert, als es der Dreieckknorpel zuläßt.

Nach White ist die Radialabduktion auf der Bahnkugel in einer Ausdehnung von 22° zwischen der Mittellinie des 3. Metacarpalknochens in der Sagittalebene des Vorderarms möglich. Nach seiner Ansicht findet diese Bewegung ausschließlich im Intercarpalgelenk statt. In Beziehung zum Radius soll keine Bewegung der proximalen Reihe als Ganzes stattfinden. Das Hamatum wird nach distal vom Lunatum verschoben und ermöglicht

damit dem Triquetrum eine stärkere Annäherung an das Capitatum. Die Vieleckbeine bewegen sich nach Whites Angabe 3 bis 5 mm radial- und gleichzeitig etwas dorsalwärts zum proximalsten Abschnitt der Facette des Köpfchens des Naviculare hin gerichtet. Dieser Knochen wird dabei etwas volarwärts gekippt und um seine Längsachse gedreht.

Die beschriebene Volarkippung des Naviculare und die Distalbewegung des Hamatum erlaubt eine Annäherung zwischen dem Tuberositas navicularis und dem lateralen Rand des Triquetrums.

White faßt zusammen, daß die Radialabduktion nur im distalen Carpalgelenk stattfindet, die Ulnarabduktion fast vollständig eine Gleitbewegung des Radiocarpalgelenkes darstellt. Im Vergleich zu den anderen Knochen aus der proximalen Handwurzelreihe hat das Naviculare einen außerordentlich großen Spielraum in seiner Bewegung.

Über die Änderung des Bewegungsmechanismus und -umfanges innerhalb des Gelenkes unter funktioneller Belastung sind in der Literatur jedoch keinerlei Angaben zu finden. Diese Mechanismen zu analysieren und aufzuzeigen, ist die Aufgabe der vorliegenden Untersuchung. Es muß jedoch hervorgehoben werden, daß die gelenkigen und neuro-muskulären Verknüpfungen so außerordentlich kompliziert sind, daß diese Untersuchung sich nur auf das Naviculare und seine Stellung bei der ulnaren und radialen Abduktionsbewegung beschränken muß. Streckung und Kreiselung des Handgelenkes werden nur kurz gestreift, spezielle Analysen müssen einer späteren Untersuchung überlassen bleiben.

Wie bereits betont, ist das Handgelenk ein zusammengesetztes Gelenk. Die Hauptgelenke werden durch zahlreiche kleine Nebengelenke ergänzt, die eine mehr oder minder große Verschieblichkeit der Handwurzelknochen gegeneinander ermöglichen, so daß die Gelenkkörper sich ein hohes Maß an Plastizität erhalten (Benninghoff u. Goerttler).

Nach Goerttler ist beim Handgelenk der integrierende Anteil für die Gestaltung der Gelenkmechanik das Nervensystem, weniger der Zwangslauf des Gelenkapparates.

Für ein besseres Verständnis der folgenden Ausführungen erscheint es uns nützlich, an Hand einiger schematischer Abbildungen die wichtigsten anatomischen Tatsachen über das Handgelenk kurz zusammenzufassen.

Morphologie des Handgelenkes

An der Handwurzel sind zwei Hauptgelenke unterscheidbar (Abb. 1): ein proximales Radiocarpalgelenk = *Articulatio radiocarpea* und ein distales Intercarpalgelenk = *Articulatio mediocarpea*.

Die Gelenkfläche des Radius bildet eine seichte eischalenförmige Pfanne, deren große Achse quer zur Unterarm-längsachse, im rechten Winkel zur

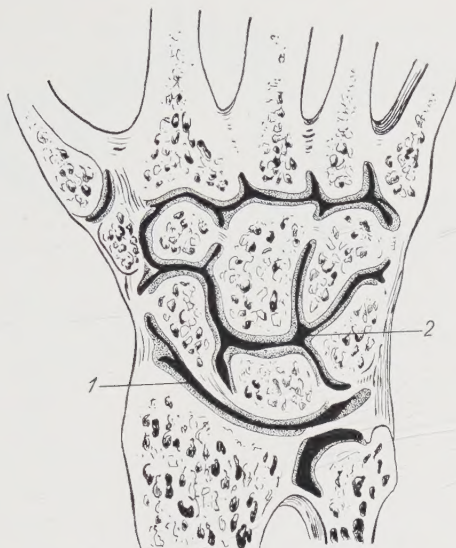


Abb. 1. Flachschnitt durch den Carpus zur Darstellung der Gelenkspalten

1 = Radiocarpalgelenk 2 = Mediocarpalgelenk

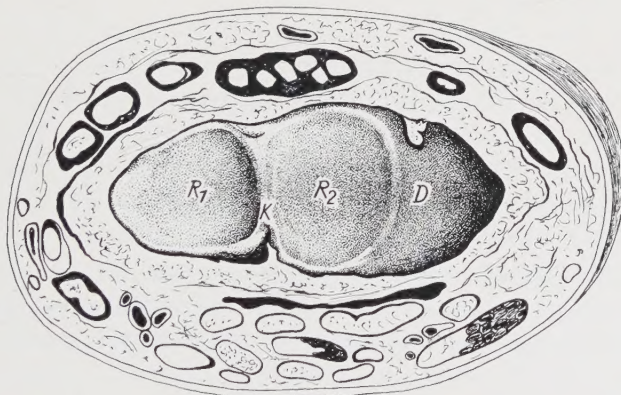


Abb. 2. Aufsicht auf die Gelenkpfanne des Radiocarpalgelenkes

R = Gelenkfläche des Radius

D = Discus

R_1 = Facette für das Naviculare

R_2 = Facette für das Lunatum

K = Knorpelleiste

Unterarm längsachse steht. Der Knorpelleiste zwischen den beiden Facetten dieser Gelenkpfanne wird von Henkel und Meyer eine besondere Bedeutung für die passive Gelenkführung zugeschrieben, Fick bestreitet das (Abb. 2).

Das proximale Handgelenk

Der eiförmige Gelenkkopf (Abb. 3) wird von der proximalen Handwurzelreihe gebildet. Er ist erheblich größer als die Pfanne selbst. Zwischen den

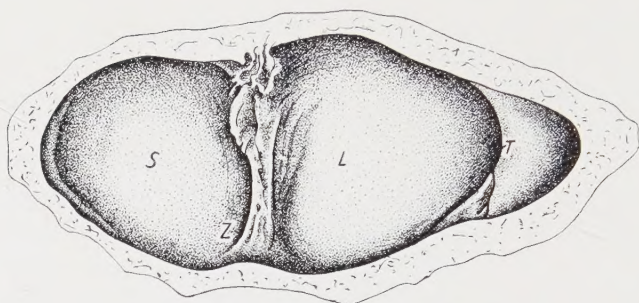


Abb. 3. Gelenkkopf der proximalen Handwurzelreihe

S = Scaphoid

L = Lunatum

T = Triquetrum

Z = Zwischenknochenband

drei Hauptknochen — Naviculare, Lunatum und Triquetrum — sind die Zwischenknochenbänder von einem Faserknorpelüberzug gegen das Gelenk hin abgeschlossen, so daß der Gelenkkopf einen fortlaufenden Knorpelübergang besitzt (Abb. 1 und 3). Nach Fick artikuliert das Triquetrum im Normalfall selten mit dem Discus und praktisch nie mit dem Radius, so daß der Handgelenkkopf praktisch nur aus Kahn- und Mondbein besteht.

Die Gelenkkapsel des ersten Handgelenkes ist ein ziemlich geräumiger Sack, der überall dicht an den Rändern der Gelenkflächen entspringt. Auf der Volarseite ist die Kapsel dichter und fester als auf der Rückseite. Die Verstärkungszüge überspringen meist nicht nur das erste, sondern auch das zweite Handgelenk. Fick warnt davor, die Bedeutung der Faserzüge — der sogenannten Handbänder — zu bagatellisieren und sie lediglich in schräge, rautenförmige und sternförmige Bandmassen zu gliedern.

Auf der Volarseite des Handgelenkes haben wir zwei wichtige Verstärkungsbänder. Das eine entspringt von der Ulna (Abb. 6) und das andere vom Radius (Abb. 4). Die tiefer gelegene Portion des ligamentum radio-



Abb. 4

Das Lig. radio-carpeum volare



Abb. 5. Lig. radio-carpeum volare. Direkte — gerade Faserzüge zur proximalen Reihe (Erläuterungen im Text) v. B. = volares Bogenband

carpeum volare (Abb. 5) verläuft in gerader Richtung, der oberflächliche Anteil mehr schräg (Abb. 4).

Den beiden volaren Unterarmhandgelenksbändern steht ein dorsaler Bandapparat gegenüber (Abb. 7).



Abb. 6

Lig. ulno-carpeum volare

a = schräge Faserzüge zum Lunatum und Capitatum,

b = proximale Bündel zum Radius



Abb. 7. Der dorsale Bandapparat

1 = diagonal-ulnarwärts verlaufendes und am Triquetrum inserierendes Faserbündel

2 = direkt zum Naviculare verlaufendes Bündel

3 = vom radialen Collateralband

4 = lig. carpi collateralia ulnae

Nach Brauss u. Elze ist der Abstand zwischen Processus styloideus ulnae und dem Carpus wegen des zwischengelagerten Discus articularis besonders groß (Abb. 1). Daher könne ein langes Band an dieser Stelle stärker hemmen als ein kürzeres auf der Radialseite. Außerdem soll die quere Richtung der Flächenbänder, als wichtiger Hemmungsfaktor der radialen Abduktion, die Schwäche des ulnaren Seitenbandes ausgleichen. Seiten- und Flächenbänder stehen somit in enger Korrelation und sind nur gemeinsam zu verstehen. Für die Beugung haben die Seitenbänder keine Bedeutung. Den echten Kapselverstärkungsbändern, die also zwischen Pfanne und Kopf ausgespannt sind, steht ein eigener Bandapparat, der die einzelnen Teile des in sich verformbaren Gelenkkopfes untereinander verknüpft, gegenüber.

Die volaren und dorsalen Bogenbänder überbrücken die vertikalen Gelenkspalten zwischen den proximalen Handwurzelknochen. Sie verhindern ein Entfernen der Knochen voneinander, erlauben aber ein Gleiten (Abb. 5 und 8).

Das Erbsenbein, welches im allgemeinen mit zur proximalen Handwurzelreihe gerechnet wird, nimmt insofern eine Sonderstellung ein, als es sich hier um ein Sesambein in der Sehne des Flexor carpi-ulnaria handelt, die durch das Ligamentum piso-hamatum bis zur distalen Reihe weiterhin fortgesetzt wird (Abb. 8). Die Bandverbindungen ermöglichen ein ausgiebiges Gleiten des Pisiforms auf dem Triquetrum. Lediglich das Ligamen-

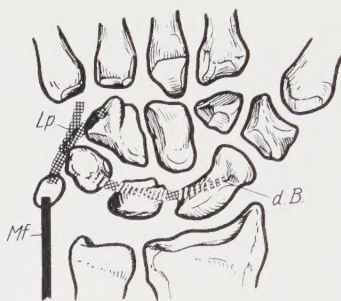


Abb. 8.

d. B. = dorsales Bogenband*Mf* = *Musc. flexor carpi ulnaris**Lp* = *Lig. piso-hamatum + piso-metacarpeum*

tum piso-hamatum gewinnt eine Bedeutung, da diese Bänder die Muskelwirkungen des *Flexor carpi ulnaris* auf die zweite Carpalreihe übertragen und außer der Dorsalflexion im wesentlichen auch die Radialabduktion der Hand hemmen sollen.

Das Intercarpalgelenk (vgl. auch Abb. 1)

Dieses Gelenk bildet seiner Form nach — von volar wie von dorsal betrachtet — zwei organisch zusammengehörende Gelenkkörper. Der radiale Gelenkkörper wird vom *Multangulum majus* (P. N. Trapezium) und *Multangulum minus* (P. N. Trapezoideum) auf der einen Seite und auf der anderen Seite vom *Capitatum* und *Hamatum* gebildet. Insofern ergibt sich hier eine Analogie zum Fußskelett, bei dem auch der 1. und 2. Strahl eine Einheit bilden und der 3. bis 5. eine korrespondierende Einheit.

In der herkömmlichen Weise wird das Intercarpalgelenk als eine S-förmige Linie beschrieben, bei der radial die proximale Reihe Kopf und die distale Pfanne und ulnar die proximale Reihe Pfanne und die distale Kopf bilden soll. Für die Mechanik des Handgelenkes erscheint es uns jedoch richtiger, drei Gelenke getrennt zu betrachten, nämlich (Abb. 9):



Abb. 9. Das Medio-Carpalgelenk (Intercarpalgelenk)

Gelenklinie 1 — — — — —

Gelenklinie 2

Gelenklinie 3 —————

(Erläuterung im Text)

1. das Gelenk zwischen Naviculare einerseits und Multangulum majus (P. N. Trapezium) und Multangulum minus (P. N. Trapezoideum) andererseits (Abb. 9 —),
2. das Gelenk zwischen Capitatum und Hamatum (Abb. 9 . —) einerseits und Lunatum und Triquetrum andererseits, welches sich jedoch in das
3. Gelenk zwischen Capitatum einerseits und Multangulum minus (P. N. Trapezoideum) und Naviculare andererseits fortsetzt (Abb. 9 —).

Das gesamte sogenannte Intercarpalgelenk steht nun aber auch mit den Gelenkspalten zwischen den einzelnen Elementen der proximalen und distalen Reihe direkt in Verbindung (Abb. 1 s. S. 249).

Der Bandapparat des distalen Handgelenkes ist der Gelenkform entsprechend und der mannigfaltigen Verknüpfung recht kompliziert zusammengesetzt und gewinnt erst bei funktioneller Betrachtung eine gewisse sinnvolle Verständlichkeit. Auch in der Literatur besteht eine ziemliche Verwirrung in der exakten Beschreibung dieses Bandapparates (Arnhold, Poirier, H. Meyer, H. Virchow, Haehnle, Barkow, Sapay und Fick).

Zur Sicherung des gesamten Bandapparates trägt zweifelsohne auch noch das Ligamentum carpi transversum bei. Das Band verhält sich zum knöchernen Bogen der Carpalknochen wie eine gespannte Sehne. Auf diese Weise unterstützt es auch die hemmende Wirkung der eigentlichen Verstärkungsbänder des Handgelenkes (Brauss u. Elze). Für den dorsalen Bandapparat (Abb. 7) lassen sich nach Fick keine festen Regeln aufstellen.

Die Gelenkspalten zwischen den Elementen der distalen Carpalreihe

Zwei wichtige Tatsachen müssen nach Fick hervorgehoben werden: Die ulnaren Flächen der distalen Carpalknochen sind sämtlich konkav, die radialen konvex. Gelenkmechanisch können wir sie vielleicht als ein „Lamellenkugelgelenk“ mit progressiven Bewegungsmöglichkeiten betrachten.

Auf der volaren Seite lassen sich die einzelnen queren Verstärkungsbänder nicht leicht isoliert darstellen. Sie werden im allgemeinen mit zum Carpi radiatum gerechnet und sind außerdem mit dem fibrösen Carpalkanal fest verhaftet. In der Literatur ist meist nur angegeben, daß die quer verbindenden Bandzüge „quer verlaufen“. Den Bewegungsmöglichkeiten entsprechend (siehe Lamellengelenk) muß jedoch angenommen werden, daß in den quer verlaufenden Bandzügen eine diagonal gekreuzte Faserrichtung besteht, die in ihren Funktionen vielleicht mit dem Mechanismus der Kreuzbänder im Kniegelenk vergleichbar ist.

Lange Querverbindungen zwischen Multangulum majus (P. N. Trapezium) und Capitatum werden von Arnhold als kurzes oberflächliches Jochband

beschrieben, das das Multangulum minus (P. N. Trapezoideum) überspringt (Abb. 10a).

Eine Diagonalverbindung zwischen dem Trapez und dem Hakenbein bezeichnet Arnold als tiefes oder langes Jochband (Abb. 11b).



Abb. 10. Jochbänder als quere Bandverbindung der distalen Reihe
a = kurzes oberflächliches Jochband
b = tiefes oder langes Jochband

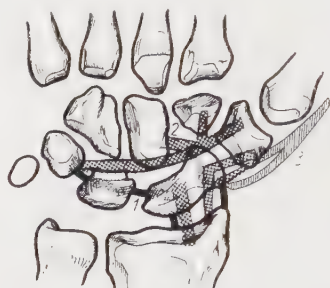


Abb. 11. Der Bandapparat des Naviculare
 1 = dorsale Bänder
 2 = volare Bänder
 3 = Ursprünge des M. abductor pollicis brevis

Besonderer Beachtung bedarf das Zwischenknochenband des Multangulum minus (P. N. Trapezoideum). Dieses Band stellt eine sehr feste Verbindung zwischen den beiden benachbarten Knochen her, so daß sie gelenkmechanisch als ein Körper imponieren.

Das Zwischenknochenband des Capitatum und Hamatum liegt volar. Es ist nach Fick das kräftigste von allen.

Das Os Naviculare

Das Naviculare ist der beweglichste Knochen unter den Carpalia. Es artikuliert sowohl mit dem Multangulum majus (P. N. Trapezium) als auch mit dem Multangulum minus (P. N. Trapezoideum). Gegenüber diesen beiden Knochen bildet es einen Gelenkkopf. Andererseits artikuliert das Naviculare mit dem Capitatum, indem es für dieses eine Pfanne bildet. Im Radiocarpalgelenk erscheint es jedoch als Gelenkkopf gegenüber dem Radius und wird nach ulnar durch das Lunatum und Triquetrum ergänzt. Die Bewegungsmöglichkeiten sind daher außerordentlich vielgestaltig, zumal der Bandapparat bestimmte Bewegungen bevorzugt ermöglicht (Abb. 11).

So finden sich auffälligerweise die größten Bandmassen auf der Volarseite. Sie strahlen mehr oder weniger radiär vom Tuberculum des Naviculare aus und können als Verstärkungsbänder für die drei genannten Gelenke aufgefaßt werden. Auf der Dorsalseite ist die Bandfesselung nur gering. Die queren und längsverlaufenden Faserzüge sind so angeordnet, daß sie gleichzeitig eine Bewegungsmöglichkeit zwischen den Multangulum minus

(P. N. Trapezoidea) und dem Naviculare einerseits und dem Naviculare und dem Radius andererseits zulassen, wobei das bogenförmige Band zum Triquetrum gerade in der Drehachse dieser Bewegung liegt und sie infolgedessen nicht hemmt. Durch das letztgenannte Band wird aber gleichzeitig die proximale Reihe der Handwurzelknochen untereinander verknüpft, so daß das Naviculare bei seiner Rotation um die Querachse im Radiocarpalgelenk durch dieses Band nicht gebremst wird, aber bei der Ulnarabduktion mit der proximalen Reihe verknüpft bleibt. Bei der Ulnarabduktion bewirken diese drei Züge (vom Triquetrum und die beiden vom Radius) die zwangsläufige „Entfaltung“ des Naviculare durch eine Dorsalkippung. Das Naviculare ist aber nicht nur durch Bandmassen mit dem Multangulum majus (P. N. Trapezium) und Multangulum minus (P. N. Trapezoideum) verbunden, sondern gleichzeitig durch die beiden Ursprünge des Abductor pollicis brevis muskulär verknüpft.

Auch in pathologischer Hinsicht nimmt das Naviculare in der Reihe der Handwurzelknochen eine Sonderstellung ein. Die außerordentlich große Beweglichkeit des Knochens einerseits und andererseits seine vielfältigen Band- und Muskelverknüpfungen mit der Nachbarschaft machen es verständlich, daß gerade dieses Skelettstück für ein Trauma prädestiniert ist. Sein eigenartiger Bau mit einer Knochenverdickung an den Enden und relativ schmaler Taille bietet einen Locus minoris resistentiae, so daß die Kontinuitätstrennung durch eine Bruchlinie geradezu anatomisch vorgebildet erscheint.

Im Rahmen unserer Untersuchung interessiert die Navicularepseudarthrose und die Navicularefraktur insofern, als die Beweglichkeit der beiden voneinander getrennten Fragmente die äußeren Zugwirkungen auf die Einzelabschnitte isoliert zeigt und damit die Analyse der einwirkenden Kräfte erleichtert.

Nach Heidemann ist beim Sturz auf die dorsalflektierte Hand das Naviculare durch den Bandapparat so fixiert, daß es durch Gewaltübertragung vom Radius, nach Liliensfeld und Ebermayer durch Druck des Capitatum gebrochen wird.

Nach Herzog und Bruchholz ist für die Navicularfraktur die Minusvariante der Speiche von Bedeutung.

Die häufigen Pseudarthrosebildungen und die schlechten Heilungserfolge bei Navicularfrakturen werden von Lexer, Pommer, Schneck und Lützeler auf eine mangelhafte Blutversorgung der Fragmente zurückgeführt.

Nach Rehbein ist das Naviculare ständig ziehenden und scheren den Kräften ausgesetzt, die es sowohl zu Bewegungen in der Horizontalen wie in der Vertikalen zwingen und die sich bei einer Kontinuitätsstörung des Knochens vorwiegend auf das distale Fragment auswirken. Die meisten

Autoren (Rehbein, Düben, Berger, Mommsen, Baumann und Contzen) sind sich darüber einig, daß die Therapie darauf abzielen muß, die fehlerhafte Mechanik auszuschalten.

Auf die abweichende Gelenkmechanik nach Navicularfrakturen weist Rehbein besonders hin, wonach ein Teil der Volarkippung des Naviculare im Frakturspalt erfolgen und bei Volar- und Dorsalflexion Bewegungen, die früher in den anliegenden Gelenken sich abspielten, in den Bruchspalt verlagert werden.

Eigene Untersuchungen Allgemeine Methodik

Mit dem Verfahren der Röntgenschirmbildkinematographie war es bisher infolge der großen Strahlenbelastung der Versuchsperson nicht möglich, exakte Funktionsanalysen zur Gelenkmechanik zu gewinnen. Hinzu kam die mangelnde Zeichenschärfe des Schirmbildverfahrens und insbesondere die Latenz (Nachleuchten) des Schirmes bei Aufnahmen über 8 Bilder/s. Durch die Zuhilfenahme eines Röntgenbildverstärkers gelingt es jetzt, bei außerordentlich geringer Strahlenbelastung der Versuchsperson kontrastscharfe Röntgenkinoaufnahmen zu erzielen.

Für unsere Untersuchungen stand uns ein 4-Ventil-Müller-Gerät zur Verfügung mit Drehanodenröhre; als Bildverstärker ein Versuchsmodell der Firma Philips mit einem 4000fachen Bildverstärkungsfaktor¹. Die Kinoaufnahmen wurden mit einer Bolex H 16 auf Gevapan 36 Negativspezial-

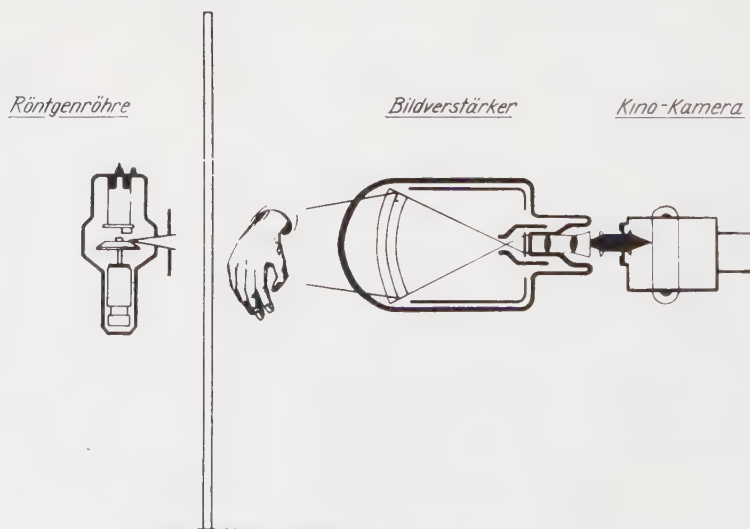


Abb. 12. Versuchsanordnung

¹ Das Gerät wurde in dankenswerter Weise von der Deutschen Forschungsgemeinschaft zur Verfügung gestellt.

material durchgeführt. Die Bolexkamera H 16 war mit einem eigens dafür konstruierten Ansatz auf den Philips-Verteilerkopf montiert. Die Verwendung eines 50-mm-Teleswitar ermöglichte eine optimale Ausnutzung des 9-Zoll-Verstärkerbildes. Als Versuchspersonen stellten sich eine Anzahl von Studenten zur Verfügung, bei denen nach vorheriger Kontrolle festgestellt war, daß sie keinerlei pathologische Veränderungen im Bereich des Handgelenkes und der Innervation der Handmuskeln aufweisen. Es wurden insgesamt 10 Versuchspersonen getestet.

Fokussiert wurde auf den Hals des Capitatus: der Unterarm der Versuchsperson war auf einem Stativ mit 2 breiten Manschetten fixiert, um kombinierte Pro- und Supinationsbewegungen und Bewegungen im Ellenbogen auszuscalten.

Untersucht wurden insgesamt 9 Handgelenke. Von diesen wurden zur metrischen Einzelfilmbildanalyse 4 herausgegriffen, die unter völlig gleichen Bedingungen aufgenommen worden waren.

Es wurden untersucht Radial- und Ulnarabduktion (Abb. 13 und 16).

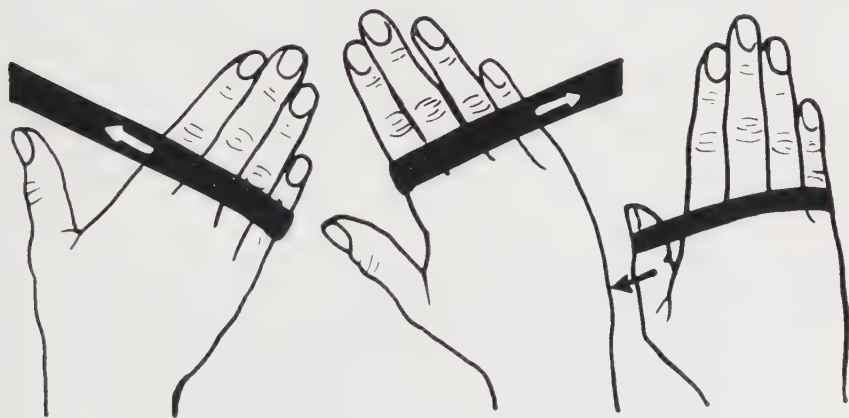


Abb. 13. Abduktionsbewegung unter Belastung

- Die weißen Pfeile geben die Zugrichtung des Gummibandes an
- der schwarze Pfeil in c die Richtung der intendierten Bewegung des Daumens

Die belichteten Filme wurden in der Kopieranstalt entwickelt, die einzelnen Filmbilder etwa 20fach vergrößert und die Konturen der Carpalknochen sowie des Radius und der Ulna auf Klarfolien übertragen. Diese Methode gestattet Einzelfilmbildanalysen und direkten Vergleich der Knochenverschiebung durch Kombination der Folien (Abb. 14).

Außer dieser direkten messenden Filmbildanalyse wurden die einzelnen Bewegungsphasen im Lauffilm zu endlosen Bändern geklebt und der Bewegungsvorgang direkt verfolgt und beschrieben.



a



b

Abb. 14. Kombination der Folien zur Einzelauswertung (c)
 a) Röntgenaufnahme b) Knochenkonturen von Radius, Naviculare und Metacarpus I und V

Befunde

Protokolle der direkten, subjektiven Filmanalyse
 Schlaufe Nr. 1 (seitlich: Beugung und Streckung):

Bei der Extension fällt auf, daß diese Bewegung in zwei Phasen abläuft. In der 1. Phase kommt es im wesentlichen zu einer Rotation des Kopfes des Capitatus im Lunatum; erst in der 2. Phase bei Überextension zu einer Dorsalkippung der proximalen Handwurzelreihe im Radiocarpalgelenk.

Bei der Volarflexion rotiert das Capitatum um eine transversale Achse. Das Naviculare zeigt nur eine geringe Abkippung nach volar, ebenso die proximale Reihe gegenüber dem Radius in Überflexionsstellung (Abb. 15).



a



b

Abb. 15
 a) Handgelenk seitlich in Extensionsstellung
 C = Capitatum
 L = Lunatum
 b) Handgelenk seitlich in Volarflexion
 N = Naviculare
 T = Trapezium (Multangulum majus)

Schlaufe Nr. 2 (Handkreiseln):

Am auffälligsten ist die Koppelung des 4. und 5. Strahls mit dem Hamatum und dem Pisiforme durch das Ligamentum pisohamatum. Gegenüber dem Triquetrum weist das Pisiforme eine starke Verschiebung bei der Radialabduktion und gleichzeitiger Beugung auf. Der Spalt zwischen Lunatum und Triquetrum wird vergrößert -- beim Übergang von der Beugung zur Ulnarabduktion ist jetzt die Ulnarabduktionsbewegung zweiphasig. Die erste Bewegung findet im Intercarpalgelenk statt; erst die zweite -- bei extremer Ulnarabduktion -- im Radiocarpalgelenk. Im besonderen muß auf die Koppelung der Bewegungen des Naviculareköpfchens mit dem Multangulum majus (P. N. Trapezium) hingewiesen werden. Beide Knochen bewegen sich in der Gesamthandbewegung gemeinsam, wobei aber das Multangulum majus (P. N. Trapezium) während dieser gemeinsamen Bewegung wie ein Satellit um das Naviculareköpfchen kreist. Eine ähnliche Kombination ist beim Pisiforme und im Triquetrum festzustellen.

Beim Übergang der Extension auf die Radialabduktion fällt nach einem anfänglichen Volarkippen des Naviculare auf, daß dieser Bewegungsvorgang plötzlich gebremst wird, so daß die weitere Radialabduktion, die nun gleichzeitig in die Beugung übergeht, nur noch im Intercarpalgelenk und insbesondere zwischen dem Naviculareköpfchen und Multangulum majus (P. N. Trapezium) stattfindet. In dieser Phase wird auch der Spalt zwischen dem Lunatum und dem Triquetrum verbreitert; die Knochen der proximalen Reihe zeigen dabei eine dachziegelartige, überlappede Verschiebung (shifting).

Schlaufe Nr. 3 (a.-p.-Aufnahme: Radial- und Ulnarabduktion):

Bei der Ulnarabduktion fällt die Koppelung des Pisiforme mit dem Triquetrum und dem 4. und 5. Strahl auf. Bei der Rückbewegung der Hand aus extremer Ulnarabduktion zur Grundstellung kommt es in einer ersten Phase zu einer Gleitbewegung im radialen Anteil des Radiocarpalgelenkes. In der zweiten Phase werden Lunatum und Triquetrum anscheinend harmonikaartig auseinandergezogen. Das Köpfchen des Capitatus rotiert nun radialwärts im Intercarpalgelenk (Lunatum) um eine a.-p.-Achse, die etwa durch den Hals des Capitatus zu legen ist. Vor der weiteren Radialabduktion fällt etwa in der Grundstellung eine Bremsung der Navicularebewegung auf. Das rechte Naviculare beginnt jetzt volar abzukippen und erfährt dabei einen Linksdrall gegen den Uhrzeigersinn, etwa um seine Längsachse. Das Multangulum majus (P. N. Trapezium) rotiert gleichzeitig über dem Naviculareköpfchen in einem Rechtsdrall, so daß hier eine gegensinnige Torsion des Naviculare und des Multangulum majus (P. N. Trapezium) auffällt. Bei diesen Bewegungen, die an der unbelasteten Hand analysiert wurden, fällt die schon von den Röntgenologen beschriebene „typische“ Entfaltung des Naviculare bei der Ulnarabduktion auf. Sie findet sich bei allen Versuchspersonen, aber nur ohne Belastung (Abb. 16).

Der Bewegungsmechanismus des Naviculare ist außerordentlich kompliziert. Bei häufiger Betrachtung seiner Bewegungen bei der Ulnar- und Radialabduktion ist eine gewisse Harmonie nicht zu übersehen. Das Navi-

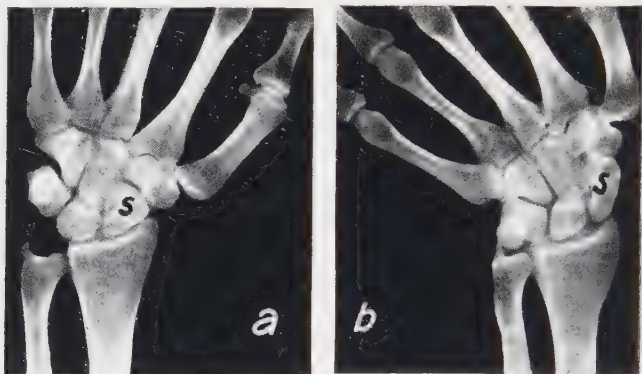


Abb. 16. „Typische Entfaltung“ des Naviculare bei Ulnarabduktion
a) Radialabduktion b) Ulnarabduktion S = Naviculare

culare bewegt sich scheinbar fast schwerelos im Raum. Der Vergleich mit den Schwimmbewegungen eines Seehundes beim Auf- und Niedertauchen liegt nahe. Das Naviculare bewegt sich auf einer gekrümmten Spiralbahn, deren Zentralachse ebenfalls wieder dorsovolar und proximodistal spiralig verläuft (Abb. 17).

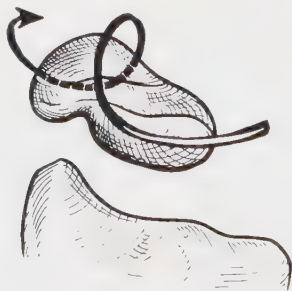


Abb. 17. Der Bewegungsmechanismus des Naviculare bei der Abduktionsbewegung: Spiralbahn
(weitere Erläuterung im Text)

Auffällig ist nun aber, daß unter Belastung dieses „schwerelose“ Gleiten und die Harmonie seiner Bewegung als unterbrochen und blockiert erscheint. Schon bei subjektiver Betrachtung im Laufbild sieht man, daß jetzt die Bauelemente des Gelenkes anderweitig verknüpft sind und daß die äußerlich scheinbar gleichen Bewegungen in anderen Gelenkabschnitten stattfinden.

Abduktionsbewegungen bei Belastung

Da es bei den hier auftretenden Abweichungen auf kleinste Nuancen ankommt, haben wir hier die Methode der metrischen Einzelfilmbildanalyse mit Kombination der überzeichneten Klarfolien angewandt.

Untersuchungsprotokolle

(metrische Einzelfilmbildanalyse)

Radial- und Ulnarabduktion mit und ohne Belastung

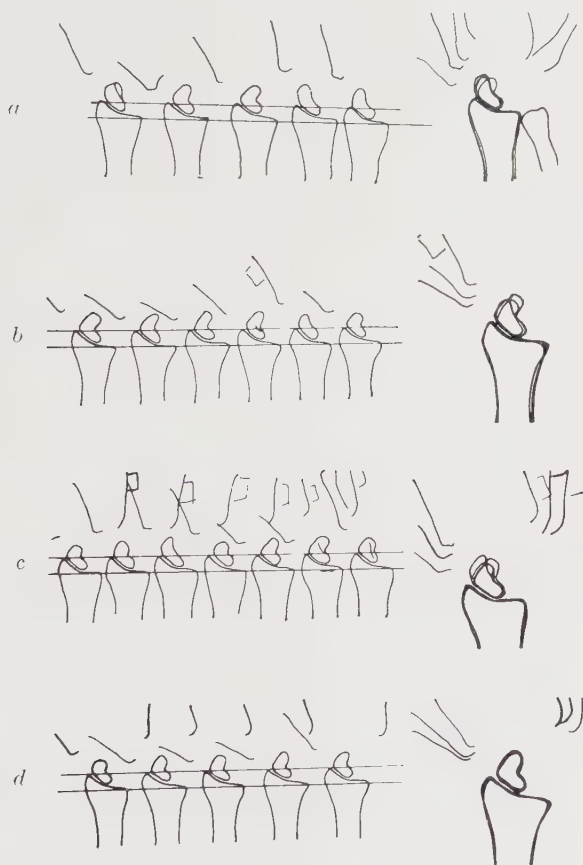


Abb. 18.

1. Hagner, männlich, 21 Jahre (Abb. 18)

a) Abduktionsbewegungen ohne Belastung:

ausgesprochen vielgestaltige Bewegung des Naviculare;
ausgiebige Verschiebung im radialen Teil des Radiocarpalgelenkes;

deutliche Volarkippung bei radialer Abduktion und „typische“ Entfaltung bei Ulnarabduktion, die jedoch bei forcierter, extremer Ulnarabduktion teilweise wieder rückgängig wird.

b) Abduktionsbewegungen gegen einen von radial
einwirkenden Widerstand:

im ganzen nur geringe Verschiebung des Naviculare im Radiocarpalgelenk;
bei der Ulnarbewegung Entfaltung nur angedeutet;
ausgesprochene Volarkippung bei radialer Abduktion.

c) Abduktionsbewegungen gegen einen von ulnar
einwirkenden Widerstand:

ziemlich ausgiebige Verschiebung des Naviculare im Radiocarpalgelenk;
Ausfall der „typischen“ Entfaltung;
geringgradigere Volarkippung als bei radialer Belastung;
parallele Verschiebung des Naviculare im Radiocarpalgelenk ohne wesentliche Änderung der Röntgenkontur;
Ausbleiben der „typischen“ Entfaltung.

d) Radial- und Ulnarabduktion bei kräftiger Abduktion
des Daumens gegen einen Widerstand:

Unverschieblichkeit des Naviculare im Radiocarpalgelenk;
Ausbleiben der „typischen“ Entfaltung bei Ulnarabduktion;
lediglich geringe Volarkippung bei radialer Abduktion;
das Naviculare im ganzen unbeweglich und blockiert.

2. Butke, 20 Jahre, männlich (Abb. 19)

a) Abduktionsbewegungen ohne Belastung:

ausgiebige Verschiebung des Naviculare im Radiocarpalgelenk;
deutliche Volarkippung bei radialer Abduktion und „typische“ Entfaltung bei Ulnarabduktion.

b) Abduktionsbewegungen gegen einen von radial
einwirkenden Widerstand:

bis auf geringe Volarkippung praktisch völliger Ausfall der Navicularebewegungen;
keine Entfaltung des Naviculare bei Ulnarabduktion.

c) Abduktionsbewegungen gegen einen von ulnar
einwirkenden Widerstand:

weitgehende Verschiebungen im Radiocarpalgelenk mit deutlicher Volarkippung bei Radialabduktion, jedoch Ausfall der Entfaltung bei Ulnarabduktion.

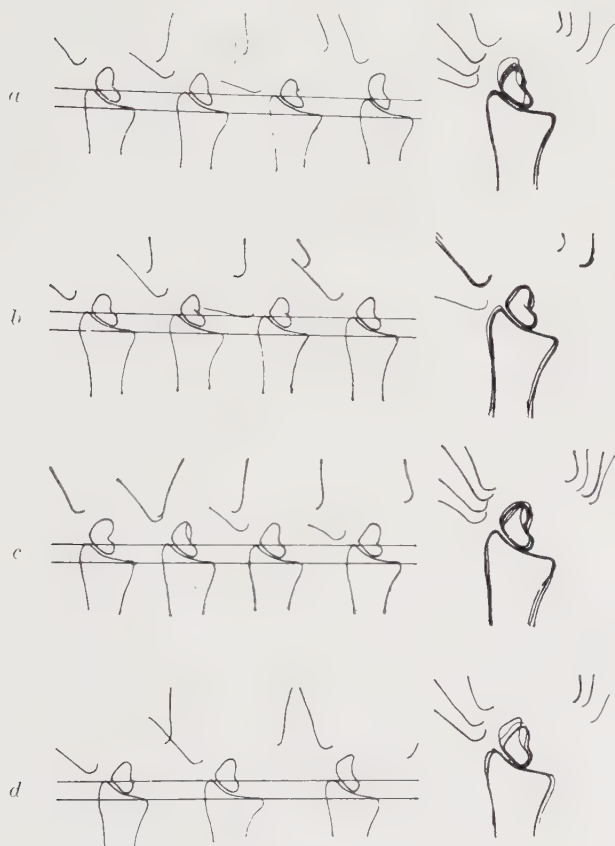


Abb. 19.

d) Abduktionsbewegungen bei kräftiger Abduktion des
Daumens gegen einen Widerstand:

mäßige Verschiebung des Naviculare im Radiocarpalgelenk (Parallelverschiebung);

ohne „typische“ Entfaltung bei Ulnarabduktion;

große Ähnlichkeit mit den Abduktionsbewegungen gegen einen von ulnar einwirkenden Widerstand.

Daumen nur fixiert;

aktive Spreizungskomponente auf der Ulnarseite. Abspreizung des kleinen Fingers gegen das Gummiband.

3. Schneuer, 21 Jahre, männlich (Abb. 20)

a) Abduktionsbewegungen ohne Belastung:

ausgiebige Verschiebung des Naviculare im Radiocarpalgelenk;

„typische“ Entfaltung bei Ulnarabduktion;

nicht ausgesprochen deutliche Volarkippung bei Radialabduktion.

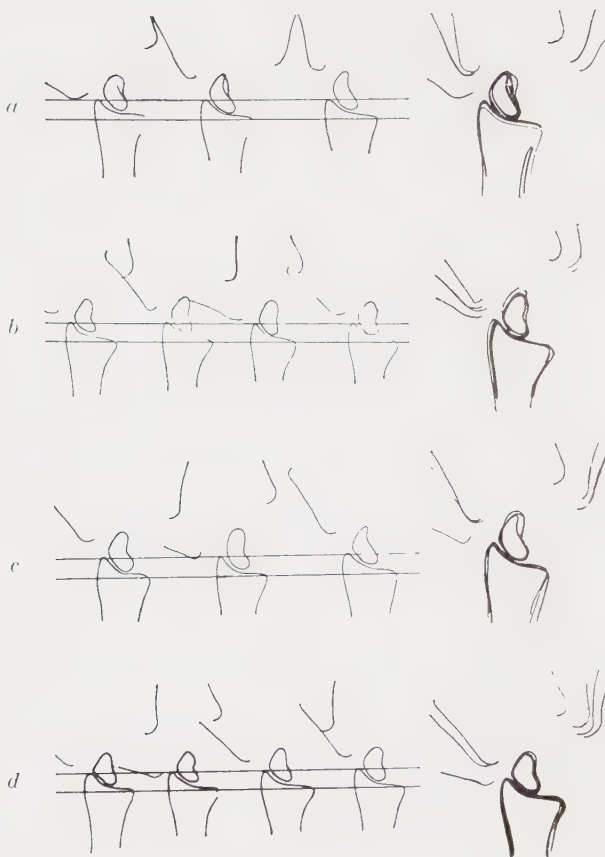


Abb. 20.

b) Abduktionsbewegungen gegen einen von radial
einwirkenden Widerstand:

geringe Verschiebung des Naviculare im Radiocarpalgelenk;
deutliche Volarkippung (ausgeprägter als ohne Belastung);
Ausbleiben der „typischen“ Entfaltung bei Ulnarabduktion.

c) Abduktionsbewegungen gegen einen von ulnar
einwirkenden Widerstand:

geringere Verschiebung am Radiocarpalgelenk;
ausgeprägte Volarkippung bei Radialabduktion und
angedeutete Entfaltung bei ulnarer Abduktion.

d) Abduktionsbewegungen bei kräftiger Abduktion
des Daumens gegen einen Widerstand:

auffällige Bremsung der Navicularebewegung;
keine Verschiebung im Radiocarpalgelenk;

Volarkippung nur angedeutet;
völliger Ausfall der Entfaltung des Naviculare.

4. Pollonius, 24 Jahre, männlich (Abb. 21)

a) Abduktionsbewegungen ohne Belastung:

ausgiebige Verschiebung des Naviculare im Radiocarpalgelenk;
sehr deutliche Volarkippung bei Radialabduktion;
„typische“ Entfaltung bei Ulnarabduktion nicht sehr ausgesprochen
deutlich.

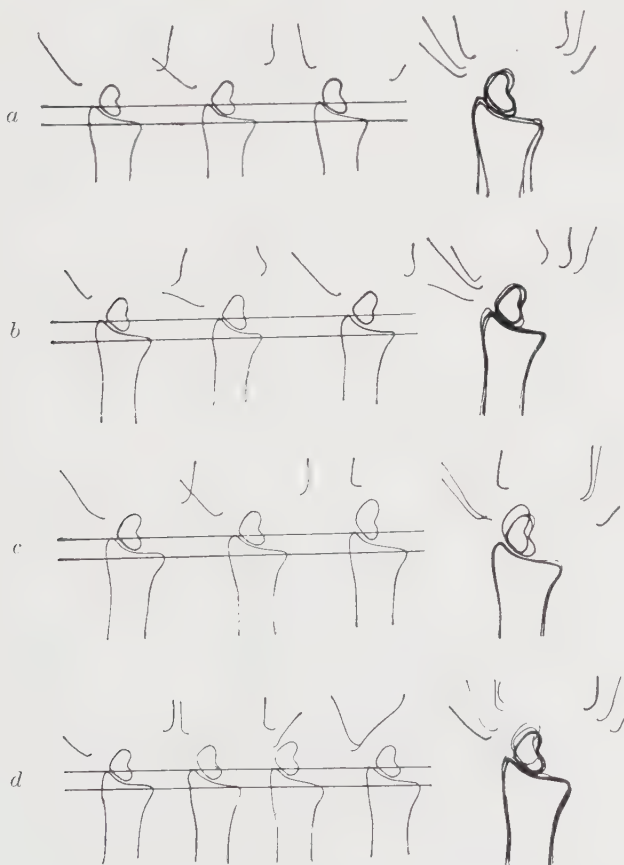


Abb. 21.

b) Abduktionsbewegungen gegen einen von radial
einwirkenden Widerstand:

geringe Parallelverschiebung des Naviculare im Radiocarpalgelenk;
angedeutete Volarkippung;
völliger Ausfall der Entfaltung bei Ulnarabduktion.

c) Abduktionsbewegungen gegen einen von ulnar einwirkenden Widerstand:

ausgiebige Verschiebung des Naviculare im Radiocarpalgelenk (Parallelverschiebung);

deutliche Volarkippung bei Radialabduktion;

Ausfall der „typischen“ Entfaltung bei Ulnarabduktion;

jedoch extreme Radial- und Distalverschiebung des Naviculare in Ulnarabduktionsstellung (Naviculare „herausgequetscht“ durch proximale Reihe).

d) Abduktionsbewegungen bei kräftiger Abduktion des Daumens gegen einen Widerstand:

Ausfall der „typischen“ Entfaltung des Naviculare;

jedoch deutliche Volarkippung bei Radialabduktion und Parallelverschiebung bei Ulnarabduktion;

ausgesprochene Ähnlichkeit zum Bild der Abduktionsbewegung gegen einen von ulnar einwirkenden Widerstand.

Das Gummiband lag um den kleinen Finger, der Daumen war lediglich fixiert, die aktive Bewegungskomponente lag auf der ulnaren Handseite.

Ergebnisse

A. Das Naviculare bei Abduktionsbewegungen ohne Belastung:

Ohne Belastung ist die starke Verschiebung des Naviculare im Radiocarpalgelenk zwischen Ulnarabduktion und Grundstellung regelmäßig.

Bis auf Fall 4 (Pollonius) ist bei ulnarer Abduktion die Entfaltung des Naviculare „typisch“;

Bremsung der Navicularbewegung in der Grundstellung;

bei radialer Abduktion aus der Grundstellung keine Verschiebung des Naviculare in seitlicher Richtung mehr im Radiocarpalgelenk, sondern Beginn der Volarkippung mit ungleichnamigen Drall, d. h., das rechte Naviculare erfährt bei der Volarkippung einen Linksdrall.

B. Das Naviculare bei Abduktionsbewegungen mit Belastung:

1. Radiale Abduktion gegen einen von radial einwirkenden Widerstand (vgl. Abb. 13, s. S. 257):

Bei radialer Abduktion gegen einen von radial her wirksamen Widerstand bleibt bei der Mehrzahl der Versuchspersonen das Naviculare relativ unverschieblich (Abb. 18b und 20b, s. S. 261 und 269).

2. Ulnare Abduktion gegen einen von ulnar einwirkenden Widerstand:

Bei der Ulnarabduktion gegen einen von ulnar wirksamen Widerstand finden wir bei allen Versuchspersonen recht ausgiebige Bewegungen bzw.

Verschiebungen des Naviculare, wenn auch die „typische“ Entfaltung ausfällt (Abb. 18c und 21c).

Am häufigsten ist die parallele Verschiebung am Ende der ulnaren Abduktionsbewegung. Es scheint, als ob der kräftige Muskelzug des Flexor und Extensor carpi ulnaris den ulnaren Discus gegen die proximale Reihe quetscht und die Carpalknochen in toto radialwärts herausdrückt. Ohne Belastung scheint der Discus beteiligt zu sein.

3. Radial- und Ulnarbewegungen im Handgelenk bei aktiver Abduktion des Daumens (Abb. 18d und 21d):

Eigenartig sind die Befunde bei fixiertem Daumen, d. h. bei kräftiger Abduktion des Daumens gegen einen Widerstand. In zwei Fällen findet dabei praktisch keine Verschiebung im Bereich des Naviculare statt. Das Naviculare scheint vielmehr muskulär „fixiert“ zu werden (Abb. 18d und 20d). Bei zwei anderen Personen kommt es zu einer ausgesprochen radialwärtigen Parallelverschiebung des Naviculare, ohne daß sich seine Röntgensilhouette ändert; also keine Kippbewegung (Abb. 19d und 21d). Eigenartigerweise hat hier das Bild eine gewisse Ähnlichkeit mit der Ulnarabduktion gegen einen ulnaren Widerstand (Abb. 20a bis 21c). Es muß daran gedacht werden, daß durch die Wirkung des Gummibandes, wenn es um den 5. Finger und nicht um die Mittelhand gelegt war, eine „scheinbare“ Ulnarbelastung stattgefunden hat, die dann zu der hierbei üblichen Verschiebung — allerdings in diesem Fall ohne Kippung — geführt hat (Abb. 22).



Abb. 22. Bewegungsmechanismus der Radial- und Ulnarabduktion bei fixiertem Naviculare
 ----- Gelenklinie, in der die Bewegung stattfindet
 ←→ Bewegungsrichtung (weitere Erläuterung im Text)

Zusammenfassung und Diskussion der Befunde

Bei zusammengesetzten Gelenken ist nach Goerttler der ausschlaggebende Anteil für die Gestaltung der Gelenkmechanik das Nervensystem und weniger der Zwangslauf des Gelenkapparates. Durch den Bandapparat

allein schon werden einzelne Skeletteile, andere erst durch Muskelwirkung zu größeren Gelenkkörpern verknüpft.

Unter den äußerlich sichtbaren Gelenkbewegungen verbergen sich unterschiedliche Mechanismen, welche von der funktionellen Verknüpfung durch Muskulatur und Bandapparat abhängig sind. Unter diesen Gesichtspunkten ergaben sich neue Aspekte für die Gestaltung der Gelenkmechanik.

Die Hauptgelenke des Carpus werden durch zahlreiche kleine Nebengelenke ergänzt. Dadurch ist die Möglichkeit einer verschieden großen Verschieblichkeit der Handwurzelknochen gegeneinander gegeben. Die Gelenkkörper gewinnen dadurch an Plastizität.

Mit Hilfe eines Röntgenbildverstärkers kann man bei geringer Strahlenbelastung der Versuchsperson kontrastscharfe Röntgenkinoaufnahmen machen.

D. A. White hat als erster in seiner Arbeit über die Mechanik des Handgelenkes funktionelle Gesichtspunkte berücksichtigt. Am Leichenpräparat rekonstruierte er durch Muskelzug Gelenkbewegungen und analysierte die Bewegungsmöglichkeiten mit Hilfe von Stereoröntgenaufnahmen.

Nach White findet die Radialabduktion ausschließlich im Intercarpalgelenk statt. In Beziehung zum Radius soll keine Bewegung der proximalen Reihe als Ganzes stattfinden. Die Ulnarabduktion dagegen besteht fast ausschließlich aus einer Gleitbewegung des Radiocarpalgelenkes. Das Naviculare hat im Vergleich zu den anderen Knochen der proximalen Handwurzelreihe einen außerordentlich großen Spielraum in seiner Bewegung.

Bei der Radial- und Ulnarabduktion ohne Belastung stellen wir bei der Ulnarabduktion die Koppelung des Pisiforme mit dem Triquetrum und dem 4. und 5. Strahl fest.

Die Rückbewegungen der Hand aus extremer Ulnarabduktion bestehen aus zwei Phasen. In der ersten kommt es zu einer Gleitbewegung im radialen Anteil des Radiocarpalgelenkes, in der zweiten dagegen werden Lunatum und Triquetrum anscheinend harmonikaartig auseinandergezogen. Etwa durch den Hals des Capitatus stellen wir uns eine a.-p.-Achse vor. Um diese Achse rotiert nun das Köpfchen des Capitatum radialwärts im Intercarpalgelenk. Es fällt in der weiteren radialen Abduktion — etwa in der Höhe der Grundstellung — eine Bremsung der Navicularbewegung auf. Das rechte Naviculare beginnt jetzt volar abzukippen und erfährt dabei einen Linksdrall gegen den Uhrzeigersinn, etwa um seine Längsachse. Das Multangulum majus (P. N. Trapezium) rotiert gleichzeitig über dem Naviculareköpfchen in einem Rechtsdrall, so daß hier eine gegensinnige Torsion des Naviculare und des Multangulum majus (P. N. Trapezium) auffällt. Die Röntgenologen bezeichnen diese an der unbelasteten Hand bei Ulnarabduktion sich abspielenden Bewegungen als die „typische“ Ent-

faltung des Naviculare, die wir bei allen Versuchspersonen, aber nur ohne Belastung sehen konnten. Der harmonische Ablauf der Bewegung des Naviculare bei Radial- und Ulnarabduktion ist sehr kompliziert. Das Naviculare bewegt sich auf einer gekrümmten Spiralbahn, deren Zentralachse ebenfalls wieder dorso-volar und proximo-distal spiralig verläuft.

Die Ulnarabduktion ist nach White fast ausschließlich eine Gleitbewegung des Radiocarpalgelenkes. Durch unsere Untersuchungen konnten wir jedoch feststellen, daß sie aus zwei Phasen besteht, nämlich:

Der radiale Anteil vollzieht im Radiocarpalgelenk eine Gleitbewegung; Triquetrum und Lunatum werden anschließend harmonikaartig auseinandergezogen.

Nach White läuft die Radialabduktion ausschließlich im Intercarpalgelenk ab. Wir dagegen sind der Auffassung, daß sich nach vorangegangener Bremsung in Grundstellung die Kippbewegung des Naviculare abspielt. Also: Lokalisation der Radialabduktion demnach im Radiocarpalgelenk und Intercarpalgelenk durch die Bewegung des Multangulum minus (P. N. Trapezoides).

Das ohne Belastung deutlich sichtbare „schwere lose“ Gleiten und die Harmonie seiner Bewegung sind unter Belastung blockiert. Schon bei subjektiver Betrachtung im Laufbild sieht man, daß jetzt die Bauelemente des Gelenkes anderweitig verknüpft sind und daß die äußerlich scheinbar gleichen Bewegungen in anderen Gelenkabschnitten stattfinden.

Bei radialer Abduktion gegen einen von radial her einwirkenden Widerstand bleibt das Naviculare bei der Mehrzahl der Versuchspersonen relativ unverschieblich.

Bei Ulnarabduktion gegen einen von ulnar wirksamen Widerstand finden wir bei allen Versuchspersonen recht ausgiebige Bewegungen, d. h. Verschiebungen des Naviculare, wenn auch die „typische“ Entfaltung ausfällt. Meist findet die parallele Verschiebung am Ende der ulnaren Abduktionsbewegung statt. Die Carpalknochen werden in toto radialwärts herausgedrückt, nämlich dadurch, daß durch den Muskelzug des Flexor und Extensor carpi ulnaris der ulnare Discus gegen die proximale Reihe gequetscht wird. Ohne Belastung scheint der Discus nicht beteiligt zu sein.

Bei fixiertem Daumen sind die Befunde am eigenartigsten. Der Daumen mußte gegen einen Widerstand eine kräftige Abduktionsbewegung ausführen. In zwei Fällen sind im Bereich des Naviculare praktisch keine Verschiebungen festzustellen. Das Naviculare wird durch einen komplexen Muskelmechanismus fixiert. Bei zwei anderen Personen blieb die Umrißzeichnung des Naviculare gleich, obwohl eine ausgesprochen radialwärtige Parallelverschiebung stattgefunden hat. Dieses Bild hat eigenartigerweise eine gewisse Ähnlichkeit mit der Ulnarabduktion gegen einen ulnaren Wider-

stand. Es muß daran gedacht werden, daß durch die Wirkung des Gummibandes, welches um den 5. und 1. Finger gelegt war, eine scheinbare Ulnarbelastung stattgefunden hat, die dann zu der sonst üblichen Verschiebung geführt hat.

Das Naviculare ist der beweglichste Knochen unter den Carpalia. Der Bandapparat ermöglicht bestimmte bevorzugte Bewegungen: Volarkippung und ungleichnamigen Drall. Während die Verknüpfung durch Bänder auf der dorsalen Seite nur gering ist, finden sich auf der Volarseite große Bandmassen.

Auf der Volarseite der Hand haben wir das (I) Ligamentum naviculo-capitatum, einen Faserzug aus dem Ligamentum radio-carpeum, und ein Band, das (II) von der Volarseite des Radius direkt zum Naviculare zieht. Nach radial wird dieses Band vom (III) Ligamentum collaterale radiale ergänzt, welches ebenfalls am Naviculare ansetzt. Das (IV) Ligamentum naviculo-multangulum minus (P. N. Trapezoideum) volare soll die gegenseitige Entfernung vom Kahn- und Trapezbein bei Ulnarabduktion hemmen. Außerdem ist das Naviculare durch das (V) Kahn-Dreieckband mit dem Triquetrum verknüpft.

Auf der Dorsalseite der Handwurzelknochen verläuft ein proximal konkaves, bogenförmiges Band zwischen der Rückseite des Triquetrums und des Naviculare. Es ist dies das (I) dorsale Kahn-Dreieckband, welches das Capitatum und das Hamatum, die zusammen den Gelenkkopf bilden, in ihrer Pfanne sichert.

Bei der Radial- und Ulnarabduktion, ohne und mit verschiedener Belastung, können wir von einer Verlagerung der Gelenkbewegungen sprechen, da die Gelenkbewegung nun in anderen Gelenkkombinationen vor sich geht. So wurde z. B. das Naviculare unter Muskelwirkung fixiert, so daß es stehenbleibt und von den übrigen Carpalknochen umkreist wird (Abb. 22).

Der Frakturmechanismus und die Pseudarthrosebildung weisen auf die Sonderstellung des Naviculare unter den Carpalia hin. Die vielseitigen Bandverknüpfungen fixieren bei Radialabduktion und gleichzeitiger Dorsalflexion das Naviculare, so daß es zwischen den Vieleckknochen und dem Capitatum eingekeilt ist. Bei der Druckübertragung beim Fall auf die Hand entwickelt das Köpfchen des Capitatoms eine regelrechte Spreng- und Scherwirkung, so daß damit der typische Querbruch erklärt ist.

Die Gelenkmechanik nach einer Navicularfraktur ist verändert. Bedingt durch die Bandverknüpfung wird ein Teil der Bewegung, insbesondere bei Volarflexion, in den Frakturspalt bzw. in die Pseudarthrose verlegt.

Die muskuläre Koppelung durch den M. abductor pollicis brevis mit dem Multangulum majus (P. N. Trapezium) und dem Daumen bedingt eine Beteiligung des radialen Fragmentes an allen Greifbewegungen, insbesondere des Daumens. Eine besondere Rolle spielt hierbei der von Fick als Lig.

navi-multangulum majus (P. N. Trapezium) collaterale — radiales Seitenband — benannte Faserzug, der die gegenseitige Entfernung von Kahnbein und Trapezbein bei der Ulnarabduktion hemmt. Auf die besonders feste Bandverknüpfung zwischen dem Körper des Capitatum, dem Multangulum minus (P. N. Trapezoideum) und dem Trapezknochen, die zusammen die distale Pfanne für das Naviculare bilden und für die Auslösung der Kippbewegung verantwortlich gemacht werden müssen, hat schon Fick hingewiesen.

Bei extremer Ulnarabduktion gegen einen von ulnar einwirkenden Widerstand erreicht das Triquetrum die distale Gelenkfläche der Dreieckplatte und übt auf diese einen Druck aus.

Zusammenfassung

Mit Hilfe röntgenkinematographischer Filmbildanalyse werden die Bewegungen im Handgelenk, insbesondere bei Radial- und Ulnarabduktion, ohne und mit Belastung untersucht. Die Gelenkbewegungen bei der Ulnar- und Radialabduktion finden unter der Belastung in jeweils verschiedenen Gelenkkombinationen und Gelenklinien statt. Unter Belastung ist die Bewegung des Naviculare am meisten betroffen. Bei allen Formen der angewandten Belastungen ist die freie Bewegung des Naviculare stark eingeschränkt. Bei extremer Abduktion des Daumens gegen einen Widerstand ist das Naviculare bei Ulnar- und Radialabduktion so vollständig fixiert, daß die Bewegung in eine Gelenklinie verlegt wird, die um das Naviculare herumführt, so daß in diesem Fall unter der Belastung nicht das Köpfchen des Capitatum als Zentralpunkt für die Gelenkbewegung anzusprechen ist, sondern das Naviculare selbst. Somit wird deutlich, daß der entscheidende Faktor für die Gestaltung der Gelenkmechanik bei zusammengesetzten Gelenken der aktive Bewegungsapparat und das Nervensystem und weniger der Zwangslauf des Gelenkapparates ist.

Schrifttum

- Arnold : zitiert nach Fick.
 Barkow : zitiert nach Fick.
 Benninghoff, A., und K. Goerttler: Lehrbuch der Anatomie des Menschen. 6. Aufl., Bd. 1, München und Berlin: Urban & Schwarzenberg 1957.
 Berger, H.: Zur Behandlung der Pseudarthrose des Kahnbeins der Hand. Chirurg **22** (1951) 412.
 van Boynin : A note on the kinematics of the wrist joint. J. Anat. **63** (1929) 259.
 Brauss, H., und C. Elze : Anatomie des Menschen. 3. Aufl., I. Band. Berlin : Springer **368** (1954) 367.
 Bruchholz, O.: Über doppelseitige Lunatummalacie. Dt. Z. Chir. **223** (1930) 297.
 Bryce, T. H.: Certain points in the Anatomy and mechanism of the wrist joint reviewed in the light of a series of Roentgen ray „photographs“ of the living hand. J. Anat. and Physiolog. **31** (1896) 59.

- Contzer, H.: Die Navicularpseudarthrose und ihre Behandlung. *Chirurg* **28** (1957) 315.
- Düben, W.: Der frische und veraltete Kahnbeinbruch der Hand. *Med. Klin.* **48** (1953) 25.
- Eber-Mayer: *Fortschr. Röntgenstr.* **12**, H. 1.
- Fick, R.: In v. Bardeleben: *Handbuch der Anatomie des Menschen*. Jena: Fischer Bd. **II**, 223 und Bd. **III** (1911) 369.
- Gaul, M.: Trümmerfrakturen des Os naviculare bei anlagebedingter Zweiteilung. *Fortschr. Röntgenstr.* **90** (1959) 644.
- Henle: zitiert nach Fick.
- Herzog, K. H.: Zur Morphologie des Handgelenks. *Bruns Beitr. klin. Chir.* **200** (1960) 33.
- Zur Handgelenksmorphologie bei Handwurzelaffektionen. *Bruns. Beitr. klin. Chir.* **200** (1960) 427.
- Hübner, A.: Zweiteilung des Kahnbeins der Hand. *Mschr. Unfallheilk.* **56** (1953) 193.
- Johnston, H. M.: Varying position of the carpal bones in the different movements at the wrist. *J. Anat. and Physiol.* **41** (1907) 109, 280.
- von Lanz, T., und W. Wachsmuth: *Praktische Anatomie*. **L. Bd.**, **III. Teil**, Arm. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer 1935. S 181—223.
- Lexer: zitiert nach Berger.
- Lilienfeld, A.: Die luxatio ossis lunati volaris eine luxatio ossis capitati dorsalis. *Arch. f. klin. Chir.* Berlin: Langenbeck **76** (1905) 641—659.
- Der isolierte, subcutane Bruch des Os scaphoid der Handwurzel, ein typischer Bruch. *Arch. f. klin. Chir.* **69** (1903) 1158—1166.
- Lützeler, H.: Die Entstehungsursache der Pseudarthrose nach Bruch des Kahnbeins der Hand. *Dt. Z. Chir.* **235** (1932) 450.
- Meyer, H.: Das Handgelenk. *Arch. Anat. Physiol.* (1866).
- Mommensen, F.: Mechanisch-biologische Gesichtspunkte für die unblutige Behandlung der verzögerten Frakturheilung der Pseudarthrose mit Angabe einer biologischen Behandlungsmethode. *Z. orthop. Chir.* **51** (1929) 472.
- Poirier, P.: *Traité d'anatomie humaine*. **1** (Paris 1911) 732.
- Pommer: zitiert nach Berger.
- Preiser, G.: Zur Frage der typischen traumatischen Ernährungsstörungen der kurzen Hand- und Fußwurzelknochen. *Fortschr. Röntgenstr.* **17** (1911) 360.
- Rehbein, F.: Zur Behandlung des veralteten Kahnbeinbruches und der Kahnbeinpseudarthrose der Hand. *Langenbecks Arch. u. Dt. Z. Chir.* **260** (1948) 356.
- Rüther, J. R.: Zur Klinik und patholog. Anatomie der Navikularfraktur. Pseudarthrosen und „Malacia“. *Z. Orthop.* **79** (1910) 485.
- Sappey: zitiert nach Fick.
- Schinz, Baensch und Friedel: *Handbuch der Röntgendiagnostik, Skelett*, Bd. **I**, 1. Teil. Stuttgart: Georg Thieme 1952.
- Schneck, F.: Die Behandlung der verzögerten Callusbildung des Os naviculare manus mit der Beckschen Bohrung. *Zbl. Chir.* **57** (1930) 2600.
- Virchow, H.: Das Skelett der ulnarwärts abduzierten und radialwärts abduzierten Hand. *Z. Morph. Anthr.* (1899).
- Über Einzelmechanismen am Handgelenk. *Verh. Physiol. Ges. Berlin* 1901—1902.

- Virchow, H.: Die Weiterdrehung der Naviculare carpi bei Dorsalflexion, etc. Verh. Anat. Ges. Halle 1902.
- Gefrierskelettpräparat der Hand und Henkesche Achsen. Verh. Physiol. Ges. Berlin (1903).
- White, D.: A detailed study of movements of the wrist joint. J. of Anatomy, vol. 70 part. I., (1935) 137.
- Wolff, R.: Die Frakturen des Os naviculare carpi nach anatomischen Präparaten. Dt. Z. Chir. 69 (1902) 401.
- Zwerg, H. G., und H. Heidemann: Navicularfrakturen, Navicularcysten und Pseudarthrosen. Langenbeck Arch. 185 (1936) 395.

Prof. Dr. A. Puff
Anatomisches Institut der Universität Freiburg i. Br.
Albertstraße 17

Lebenslauf

Am 1. 9. 39 wurde ich, Traute Hennies, als Tochter des Dr. med. Hermann Hennies und seiner Ehefrau Martha geb. Hermann in Baden-Baden geboren. Nach dem Besuch der Volksschule (in Baden-Baden und Altglashütten im Schwarzwald) trat ich in die Klosterschule zum Heiligen Grab in Baden-Baden ein. Mit dem Abschluß der Untersekunda wechselte ich auf das Richard-Wagner-Realgymnasium in Baden-Baden über und bestand dort am 14. 3. 58 die Reifeprüfung. Im Mai 1958 begann ich in Freiburg/Br. mit dem Studium der Medizin und bestand dort im Februar 1959 die naturwissenschaftliche und im Oktober 1960 die ärztliche Vorprüfung. Nach zwei Semestern in Innsbruck und Kiel nahm ich im WS 61/62 das klinische Studium in Freiburg wieder auf und legte dort nach dem SS 63 das Medizinische Staatsexamen ab.

Von November 1961 bis zum August 1962 war ich mit den Versuchen zu der vorliegenden Dissertation beschäftigt.

Danken möchte ich der Deutschen Forschungsgemeinschaft für ihre
großzügige Unterstützung und Herrn Prof. Dr. med. A. Puff für die
Überlassung des Themas und seine guten Ratschläge.